ثمرات من دوحة المعرفة

ما الثّقوب السوداء؟

باسكال بوردي



30.1.2013

ترجمة:

محمد سعيد الخلادي



ثمرات

من دوحة المعرفة

باسكال بوردي

ما الثقوب السوداء؟

ترجمة:

محمد سعيد الخلادي

مراجعة:

د. فريد الزاهي



الطبعة الأولى 1433هـ 2012م

هيئة أبوظبي للسياحة والثقافة «مشروع كلمة»

B6712 2012 QB843.B55
Borde, Pascal.
[Qu'est-ce qu'un trou noir?]
ما الثقوب السوداء؟ / تأليف باسكال بوردي؛ ترجمة محمد سعيد الخلادي؛
مراجعة . فريد الزاهي.- أبوظبي : هيئة أبوظبي للسياحة والثقافة، كلمة، 2012.
ص 81 ؛ 10×16 سم.
(سلسلة ثمرات من دوحة المعرفة)
ترجمة كتاب: Qu'est-ce qu'un trou noir?
تدمك: 978-9948-17-032-7
1 - الثقوب السوداء. 2 - الثقوب السوداء (فلك)
أ-خلادي، محمد سعيد. ب-زاهي، فريد.

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الفرنسي:
Pascal Bordé
Qu'est-ce qu'un trou noir ?



www.kalima.ae

ص.ب: 2380 أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة، هاتف: 451 6515 2 971+ فاكس: 127 6433 2 971+

هيئة أبوظبي للسياحة والثقافة
ABU DHABI TOURISM & CULTURE AUTHORITY


ما الثقوب السوداء؟

المحتويات

مقدمة

الثقوبُ السوداء هي أشياءُ تقول بوُجودها النظريةُ الحديثة في الجاذبية، أي النسبيةُ العامة. وتأتينا هذهِ الثقوبُ بتفسيرٍ مقْنع لجملة من الظواهر الفيزيائية الفلكية. ولكي نفهمَ المقصودَ بالثقوب السوداء، يجدُر بنا أن نستأنس بدْءاً بِخاصّياتِ الجاذبية كما وردتْ في نظرية نيوتن الكلاسيكية أوّلاً، ثم كما صاغَها أينشتاين في نظريته في النسبية العامة. سيكونُ لنا إذّاك من العُدَّة المعرفية ما يسِّر لنا أن نستكشِفَ ما تتَّسِم به الثقوبُ السوداء من خاصّياتٍ تثيرُ الدهْشة لا محالة، ثُمّ أن نعْمدَ إلى تأويلِ الملاحَظاتِ الفلكية التي تنتصِرُ لفكرَةِ وجودِها.

ما هي الجاذبية لدى نيوتن؟

الجاذبية قوَّةٌ من الطبيعة لها تأثيرٌ فيما يحدُث من تجاذُبٍ متبادل بين الأشياء المادية. في هذا السياق، قام عالِمُ الفيزياء الإنجليزي إسحاق نيوتن، الذي عاش في القرن السابع عشر، بصياغة القانون الآتي: تقع شِدَّة الجاذبية التي تُمارَس بين جسمين مُعيَّنينِ في علاقة تناسُبٍ مع مجموع كُتْلتيهِما (أو كمِّيةِ المادة التي يشتمل عليها كِلاهُما)، وفي علاقة تناسُبٍ عكسي مع مُربَّع المسافة الفاصلةِ بينهُما. أمّا طبيعةُ هذين الجسمين، فلا دَخْلَ لها في هذا الشأن.

على سبيل المثال، تمارِس الأرض علينا وعلى ما يُحيط بنا قوَّةَ جَذْبٍ نسمِّيها عادةً الوزن. إننا ندرك تمامَ الإدراك هذه القوةَ لأنَّ للأرضِ كُتلةً هائلةً (تقدر ب 6×10^{24} كلغ). وبالمقابِل، فإننا لا نحِسُّ

بالجاذبية التي يتسبَّب فيها ما يُحيط بِنا من أشخاصٍ أو أشياءَ. لِمَ ذلك؟ لنضرِبْ مثَلاً برجلٍ (وزنُه 75 كلغ) وامرأةٍ (وزنُها 60 كلغ) تفصِل بينهُما مسافةُ مترٍ واحد. إن قوة الجذبِ التي سيحِسُّ بها أحدُهما تُجاه الآخَرِ هي أضعفُ بمليارين من الأضعاف من وَزن كلٍّ واحدٍ منهما (وهو ما يمْكِنُ التعبيرُ عنه رياضيّاً كالآتي:

$$4500 = 1^2/60 \times 75$$

مقارَنةً معَ

$$10^{13} = {}^2(10^6 \times 6,4)/\ 10^{24} \times 6 \times 75$$

إذا اعتبرنا شُعاعَ الأرض يساوي: $6,4 \times 10^6$)

واضحٌ أنْ ليسَ في هذا ما سيَجعَلُ الواحدَ منهما يرْتَمِي في أحضانِ الآخر! وتكون هذه الجاذبيةُ أضعفَ أربع مَرّاتٍ إذا كانت المسافة الفاصلة بينهما مِترين، وأضعفَ ستَّ عشرةَ مرّةً إذا كانت المسافةُ

أربعة أمتار، وهكذا دواليك.

ويعودُ الفضلُ إلى «نيوتن» في فهمِ الامتدادِ الكونيِّ لهذه القوة، إذ إنها تمارَس على الأرض كما تُمارَسُ داخِلَ المنظومة الشمسية أو في نهايات الكون. ومن ثمَّ فالجاذبية مسؤولة عن سقوطِ التفاحةِ على الأرض (صوبَ مركزِ الأرض في واقع الأمر) بقدْر ما هي مسؤولةٌ عن سُقوط القمَر في اتِّجاه الأرض. سيقول قائلٌ: من الجليِّ مع ذلك أن القمَرَ لا يصطدم بالأرض. السرُّ في ذلك أن القمَرَ، وهو مدفوعٌ بحَركته، «يتفادى» الأرضَ كل مرَّةٍ فلا يصطدِمُ بها، أو إن شئتم، أن القوة النابذة الناتِجَةَ عن حرَكة القمر تعوِّضُ جاذبيةَ الأرضِ بكيفيةٍ بالغة الدِّقةِ. والنتيجةُ الواضحة المترتِّبة عن هذا هي أنَّ القمرَ يرسُمُ مَداراً حول الأرض؛ والكلامُ نفسُه ينسحِبُ على الكواكب في دَورانِها حول الشمس.

لقد قدَّمتْ نظرية نيوتن، وما فتئتْ كلَّ يومٍ، من الأدلةِ والبَراهينِ ما يؤكِّدُ صِحَّتَها. من ذلكَ مَثلاً، يوماً بعد يومٍ وعاماً بعد عام، تُوجَد كواكبُ المنظومة الشمسية في المواقع نفسِها التي تم تقديرُها حسابيّاً بواسطة هذه النظريةُ. أضِفْ إلى ذلك أن الجاذبية وفقَ منظور نيوتن تشكِّلُ أداة لا مَحِيدَ عنها لقِياسِ مَسيرِ المَسابِير الفضائية أو مَسيرِ الأقمار الصناعية المستخدَمة في مجال الاتصال عن بُعد. لكنَّ هذا لا يعني أن نيوتن قد فهِمَ الجاذبية أتمَّ الفهم وأكملَه ولا أن نظريته هي مِرآةٌ تعكِس الواقعَ بكلِّ دقائقِه وتفاصيلِه. الحقُّ أن لهذه النظريةِ مجالَ تطبيقٍ معيَّناً، شأنها شأن نظرياتٍ أخرى كثيرة؛ فهي تبلغ من الصحَّةً والدقَّةً مبلغاً محدَّداً ليس إلاَّ.

وفيما يتعلق بموضوع في هذا الكتاب، فإن من مَزايا هذه النظرية كونَها تتيحُ لنا أن نقتربَ مَفهومِيّاً من الثقوب السوداء عبْرَ مَقولةِ سرعة التحرُّر.

سرعة التحرُّر والنجومُ السوداء

إذا قمتَ برَمْيِ كرةٍ بعيداً بقوَّة الذِّراع، فإنها ستسقُط على الأرض مجدَّداً بعد أن ترسُمَ مَساراً اِهْليجِيّاً. فهل بالإمكان رَميُها بِما يكفي من القوة لإرسالِها إلى الفضاء؟

يتبيَّن من خلال إعمالِ قانون نيوتن أن ذلك مُمكنٌ شرط أن تُعطَى لهذه الكُرة لحظَةَ القذْفِ بها سرعةٌ تبلُغ 11. 2 كلم/ث. وهذه السرعة، التي تُسمَّى **سرعةَ التحرُّر**، هي السرعة التي تحتاجُ إليها المَسابيرُ الفضائية كي تُفلِتَ من تأثيرِ جاذبية الأرض. إنها سرعةٌ تَفوقُ تلك التي تَكونُ عليها الأقمارُ الصناعية إبَّانَ وضعِها في المدار، عِلماً أن هذه الأقمارَ تبقى حَبيسةَ الجاذبيةِ الأرضية.

إن سُرعةَ التحرُّر تتزايد بتزايُدِ كتلةِ الكوكبِ الذي يُرادُ مغادَرتُه. فهي تُساوي مثلاً 2,4 كلم/ث على سطح القمر، و 618 كلم/ث على سطح الشمس.

في هذا السياق، قام عالِم الجيولوجيا الإنجليزيُّ جون ميتشيل[1] John Mitchell، ثمَّ الرياضيُّ الفرنسي بيير سيمون دو لابلاص[2] Pierre Simon de Laplace بصياغة الاستدلال الآتي (الذي صاغَه الأوَّلُ عام 1783، ثمَّ تَبنَّاه الثاني على نحْوٍ مستقِلٍّ عام 1798): لا شيءَ يمنعُنا من الاعتقاد بأن الكون يحتوي على نجومٌ كُتلتُها من الضخامة بحيث تجعلُ سرعةَ التحرّرِ عَلى سطحِها أعلى من سرعةِ الضوءِ،

(1) جون ميتشيل (1724–1793) : عالِم إنجليزيّ تخصَّص في الفيزياء والفلك والجيولوجيا. بعضُ أعمالِه تمّتْ إعادةُ اكتشافِها من قِبل علماء الفلك في السبعينيات من القرن العشرين. وهو يعدُّ من مؤسسي علم الزلازل الحديث.

(2) بيير سيمون دو لابلاص (1749–1827): عالِم فرنسي سطعَ نجمُه في حقول الرياضيات والفلك والفيزياء. يعدُّ من أشهر أقطاب العلم في عهد نابليون، حيث كانت له إسهامات كبرى في مباحثَ شتى من الرياضيات والفلك ونظرية الاحتمالات. أثر أيما تأثير في معاصريه، خاصة بتأكيده فكرة الحتمية. ويرجع إليه الفضل في ظهور مبحث الفلك الرياضي، خاصة بفضل مصنَّفِه الميكانيكا السماوية.

التي تبلغ 300000 كلم/ث. وفي هذه الحالة، سيتعذَّر على الضوء نفسه أن يُفلِت من قوَّةِ جذب هذه الكواكب التي سَتبدو عِندئذٍ سوداءَ من بعيد، وهو ما سيَجعَلُ منها عبارةً عن «نُجومٍ سوداءَ» نوعاً ما. وبناءً على ذلك، فَقدْ تصوَّر هذانِ العالمان أن القدرَ الأكبرَ من المادة التي يحْوِيها الكونُ قد يكون خفيّاً مَحجُوباً عنْ أعيُنِنَا.

وقد كان لِزاماً أن تظلَّ هذه النُجوم السوداءُ، التي الأصلُ فيها للأسفِ أنها غيرُ مرئية، رهينةَ التأملِّ النظري الصِّرف، الأمر الذي نالَ من العناية بها وحَدَّ من الاهتمامِ بها. ومع ذلك، فهذه الفكرةُ التي مُفادُها أن هناك كواكبَ من الضخامَةِ بحيث تستطيعُ أن تَحبِسَ الضوءَ هي فكرة قُيِّض لها أن تُبعَثَ وتَرى النورَ من جديد في إطار النظرية الحديثة التي وضعها أينشتاين في الجاذبية.

ما هي الجاذبية عند أينشتاين؟

شهِدتْ بدايةُ القرن العشرين ظهورَ نظريتيْن جديدَتيْن أحْدَثتَا ثورةً في علم الفيزياء: يتعلق الأمر بنظريتَيْ الميكانيكا الكَمِّية (أو الكوانطية)، التي تتطرَّقُ إلى ما هو لامُتَناهٍ في الصِّغَر، والنسبيةِ العامَّة، التي تنصبُّ على ما هو لامتناهٍ في الكِبَر. لنترك الآن النظرية الأولى ولْنصرِفْ اهتمامَنا إلى الثانية.

لقد تحقَّقتْ ثورةُ النسبية، التي كان لألبرت أينشتاين الدورُ الأبرزُ فيها، على مرحلتين هما مرحلة النسبية الخاصة (1905) ومرحلة النسبية العامة (1915).

الفصل الأول من المسرحية:

النسبية الخاصة

لا شك أنَّ النظريةَ النسبية اكتسبتْ بعداً ثوريّاً قياساً إلى تصوُّرنا الحَدْسيِّ عن الزمان والمكان. فحسب حدسِنا، يمضِي الزمانُ بالكيفية نفسِها أيْنَما كنَّا في أرجاءِ الكون؛ ثمَّ إنَّنا نتصوَّر المكانَ إطاراً ساكناً تتحركُ الأشياء بداخِلِه. سيبيِّن أينشتاين أننا في كِلتا الحالتين واهِمُون، فالزمانُ والمكان نِسبِيَّان (من هنا أتت لفظة النسبية) وليسا مُطلقَيْن، أي ليسا «مشتركَيْن بين الجميع». والأدهى من ذلك أن الزمان لا يوجَدُ بمعزِلٍ عن المكان والعكسُ صحيح! هكذا ينبغي النظر إلى المكان الثلاثي الأبعادِ وإلى الزمان على أنهما مكوِّنان يَنتظِمان ضِمنَ بنيةٍ ذاتِ أبعادٍ أربعة تُدعى **الزّمَكان**.

يتمثلُ أحدُ أسُسِ النسبية الخاصة في كونِ جَميعِ الملاحِظين، أيّاً كانتْ حَركتُهم، يقيسونَ سُرعةَ الضوءِ

بالمقدار نفسِه (300000 كلم/ث). وتترتَّبُ عن هذا الثباتِ الذي تتَّسِمُ به سُرعةُ الضوء نتائجُ وتبِعاتٌ أقلُّ ما يُقال عنها أنها تثيرُ الاستغراب. فمَتَى أخذْنا ملاحِظيْن اثنين أحدُهما في حالة سكونٍ والآخرُ في حالةِ حركة، اتَّضَحَ أنَّه من المُتعذِّرِ أن يتَّفِقَا على قياسِ مَسافةٍ ما أو مُدَّة زمنية ما: فمقارنةً مع الملاحِظ الموجود في حالةِ سُكون، سَيَرى الملاحِظُ الموجود في حالةِ حركة أن المسافة أقصرُ (بفعل تقلُّص الأبعاد) وأن المدَّةَ أطْولُ (بفعل تمَدُّد الزمن). والحالُ أننا لا نَعِي إطلاقاً هذين الأثرَيْن في حياتنا اليومية لأنهما لا يَصيران محسوسَيْن إلا حين تصيرُ سُرعة الملاحِظ المتحرِّكِ قَرِيبةً من سرعةِ الضوء (لَنْ يُجديَ المرءَ أن يحاولَ ذلك ولو بسيَّارةٍ رياضية!).

وتَقْضي النسبية الخاصة إلى جانب ذلك بأنَّ الكتلةَ والطاقة متساويتان: يتعلق الأمر بالمعادَلَة الشهيرة المُعبَّر عنها بصيغة: $E = mc^2$ حيث تُمثِّل E

الطاقةَ، وm الكُتلةَ و c^2 مربَّعَ سرعةِ الضوء. وتُنعَت النظريَّةُ النسبيةِ بالخاصة إشارةً إلى أنَّها لا تُطبَّقُ إلا في غياب الجاذبية (أو حينَ يَجوزُ إهمالُ آثارِ الجاذبية).

الفصل الثاني:

النسبية العامة

في مرحلة لاحِقة، صَرَف أينشتاين اهتمامَه إلى تعميمِ نَظريَّتِه في النسبية على الحالة التي لا يتسنَّى فيها إهمالُ الجاذبية. في هذا السياق، تشيرُ النسبيةُ العامة إلى أن المادَّةَ (أو الطاقة، فهُما سيَّان في هذا) تُحدِث في الزمكان تقوُّساً شبيهاً بذلك الانحناء الذي تُحدثُه الكرة الحديدية إذا وُضِعت فوقَ قُماشٍ مَبسوطٍ. ولكي نفهَمَ بوضوحٍ فكرةَ التقوُّسِ هذه، حَسْبُنا أن نتصوَّرَ كائناتٍ ذَاتِ بُعدَين اثنينِ تعيشُ على سطحِ كُرَة؛ إنها كائناتٌ تحيا في فضاء مقوَّسٍ كما سيتَّضِحُ لها إذا مارَسَت الهندسَةَ في أبْسطِ

أشكالِها. وهي ستجِدُ على سبيل المثال أن مَجموعَ زوايا مثلَّثٍ هو مَجموعٌ يفوق 180°، أو أنَّ العلاقةَ بين محيطِ دائرةٍ وشُعَاعِ هذه الدائرة هي أقل من 2π، أو أنَّ خطَّ أقصَرِ طريقٍ يَقع بين نقطة وأخرى، أي الجيوديزيا، هو عبارةٌ عن جُزءٍ من دائرةٍ كبيرة (وهي دائرة يكونُ مَركزُها هو مركزَ الكُرة).

الجاذبيةَ لم يَعُدْ يُنظَرُ إليها من منظورِ النسبية العامة على أنَّها قوة، بل على أنها هندسةُ الزمكان. والمسارات التي تتَّبِعها الجزيئاتُ الدقيقة حين تكونُ في وضعية السقوطِ الحرِّ، أي حين تَكُون خاضِعةً للجاذبية وحدَها، ليست عبَارَةً عن خطوطٍ مستقيمةٍ، بل هي جيوديزيات الزّمَكان. هكذا فالمسارُ الذي ترسُمُه الأرضُ حول الشمسِ يتخِذ شكلاً اِهليجيّاً لأن هذا هو شكلُ الجيوديزيات الموجودة في جوار الشمس. ولتلخيصِ هذه الفكرة، يمكِنُ صياغتُها على غرارِ ما فعلَه عالم

الفيزياء الأمريكي جون وِيلر John Wheeler[3]، وذلك بالقولِ إن الزّمَكان يُملِي حَركَتَه على المادَّة، فيما تفرِضُ المادةُ تقوُّسَها على الزّمَكان.

والملاحَظ أن الجاذبيةَ عندما لا تكونُ أقوى من اللازِم، كما هو الحالُ في المنظومة الشمسيةِ، فإن التوقُّعاتِ التي تذهب إليها نظريةُ أينشتاين تلتقي بنظيراتها عند نيوتن. ولهذا السببِ يجتزِئُ الدارسون في مُعظَم الأحيان بجاذبيةِ نيوتن التي تتَّسِم بكونِها أبسطَ وأيسرَ في الاستعمال. لكن، يَصيرُ من الضرُورِيِّ اللجوءُ بين الفينة والأخرى إلى النسبية العامَّة للحُصُول على دِقَّة أكبر، وإنْ كانت الجاذبية خفيفة. وهذه هي الحالُ مثلاً مع مَسَارِ

(3) جون ويلر(1911–2008): عالم أمريكي تخصص في التنظير للفيزياء، حيث كانت له إسهامات بارزة، لا سيما في مجال الانشطار النووي، الذي كان ويلر أوَّلَ من وضَعَ نموذجَه. كان من مساعدي أينشتاين وحاول أن يُنهيَ مشروع النظرية الموحَّدة القائمة على النظرية النسبية.

عُطارد، هذا الكوكب الذي يُؤدِّي قُربُه من الشمسِ إلى حدوث آثارٍ نِسبِيَّة relativistes مَلحُوظةٍ (وهذا من الرَّوَائِز الكلاسيكية التي تؤكِّدُ صحَّة نظرية أينشتاين).

وعندما تَكُون الجاذبية قويّةً، يُصبِح التوسُّل بالنسبية العامَّة أمراً لا مَحيدَ عنه. ويَصِحُّ هذا الكلامُ على نَحوٍ مَخصوصٍ في دِراسة تاريخِ الكون، أي الكوْنيّات أو الكوسمولوجيا، وهو ما لن نتطرَّقَ إليه في هذا المقام، وكذا في دراسة الثقوبِ السَّوداء، التي عليها مدارُ الأمرِ في هذا الكتاب.

من النجوم السوداء
إلى الثقوب السوداء

لقد عاد مفهومُ الثُّقب الأسوَدِ إلى الظُّهور على نحوٍ غير متوقَّعٍ من خِلال مُعادَلات النسبيةِ العامَّة. كانتْ عودةً تدريجية إذْ كان لِزاماً أن تَمضيَ عُقودٌ عدَّة كيْ يتوصَّلَ علماءُ الفيزياء إلى فَهْمِ ما تنطوي عليه هذه النظرية من مَضامينَ ومقتضياتٍ وإلى تمثُّلِ ذلك تَمثُّلاً عميقاً. هكذا نَرى كيفَ أنَّ عبارةَ «الثُّقب الأسوَدِ» لم تَرَ النورَ إلا عام 1968 على يدِ جون ويلر. وفضْلاً عن ذلك، من المهم أن نَعِيَ أن الثقوب السوداءَ كما وَصفَتْها النظريةُ النسبية العامة هي أشياءُ مختلفةٌ أشدَّ الاختلافِ عن النجوم السوداء التي تحدَّثَ عنها ميتشل ولابلاص.

لِمَ الثقوبِ السوداء ... ذات لون أسود؟

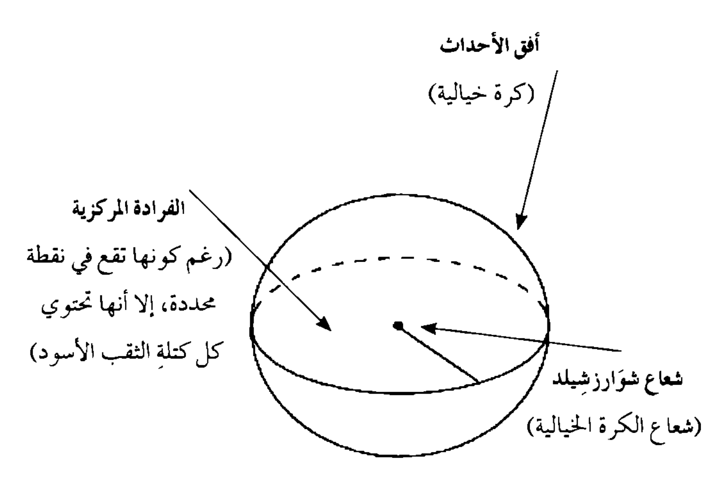
كلَّما زادَت المادَّةُ كثافةً زادَ تقوُّسُ الزّمَكانِ وكذا تقَوُّسُ مَساراتِ الجُزَيْئات الدقيقة، أي الجيوديزيات. لنتصوَّرْ أنّ بإمكانِنا إخضاعُ نجمٍ لعمليةِ ضَغْطٍ تدْريجيّة: فالملاحَظُ أنَّ كُتلة النجمَ ستبقى ثابتةً، لكن بما أنَّ حجمَه يتقلَّصُ، فإنَّ كثافتَه ستَزيدُ. وبعدَ تجاوُز عتَبةٍ حرِجَة من الكثافة، سيَشْتدُّ تقَوُّسُ الزّمَكان على نحوٍ يجعلُ الجيوديزيات تنكفِئ وتنكمِشُ، أي أنَّ جُزيئات الضَّوء (أي الفُوتُونَات) التي تصدُرُ عن السَّطحِ ستتَّبِع مساراتٍ تَعُودُ بها إلى السطح. لم يعُدْ بإمكانِ الضَّوْء إذن أن يُفلِتَ من هذه المنطقةِ من الفضاء: ها هُوَ ذا ثقبٌ أسوَدُ قدْ أتى إلى الوجود! وإلى جانبِ ذلك، تقضي النسبية العامة بأنَّهُ متَى تمَّ تخَطِّي العتَبة الحَرِجة، تكونُ الجاذبيةُ من القوَّةِ بحيثُ لا يستطيعُ أي شيءٍ أن يمنعَها من إحداثِ انهيارٍ تامٍّ للنجْمِ على ذاته. هكذا تكونُ

المادةُ كلُّها مضغوطةً في منطقةٍ محدَّدةٍ تتسِمُ بكثافةٍ لا حَدَّ لها، منطقة تُسمى **الفرَادة** **singularité**، وهي تسمِيةٌ تُوحِي بأن الأمر يتعلقُ بشيءٍ طريفٍ تجِد معَهُ الفيزياءُ الراهنة نفسَها رَهِينة حُدودٍ لا تقدِر على تجاوُزها. وهذه نقطةٌ سنَعودُ إليها لاحقاً.

إن العتَبَةَ الحَرِجةَ التي تُفضِي إلى تكوُّن ثقبٍ أسودَ هي عتبةٌ يُشَارُ إليها عموماً بعِبارة **شُعاعِ شوَارزشِيلد** **Schwarzschild**[4]، وهي عِبارةٌ اصطُلِح عليها تشريفاً لعالمِ الفيزياء الفلكيَّة الألماني كارل «شوَارزشِيلد، الذي أقبلَ سنة 1915 على إعْمالِ النظرية النسبية العامة في حِسابِ بنية الزّمَكان في المنطقة المجاوِرة لأحَدِ النجوم. ويرتهنُ هذا الشعاع

(4) كارل شوَارزشِيلد Karl (1873– 1916): عالم ألماني تخصَّص في الفيزياء الفلكيَّة. شُغفَ منذ صغره بالفلكِ والنجوم وأكبَّ على دراسة الرياضيات؛ واشتهر بنظريته في المدارات منذ عامه السادس عشر. وقد كان أوَّلَ من توصَّل، عام 1916، إلى حلِّ معادَلات أينشتاين حول الجاذبية.

فقط بكتلةِ الشيءِ موضوع الدرس، وهو يساوي 3 كلم في حالة الشمس. هكذا يغْدُو بوُسعِنا مبْدئيّاً أنْ نحوِّل الشمسَ إلى ثقبٍ أسودَ شَريطةَ أن نُخضِعَها للضغْطِ داخل كُرَة لا يتعدَّى شعاعُها 3 كلم. أما الأرض، التي لَها كتلةٌ أقلُّ بكثير، فإنَّ شُعاعَ شوَارزشِيلد لا يتجاوزُ فيها سنتيمتراً واحِداً. ولأنْ ليس ثمَّةَ من وسيلة للخروج من الثقب الأسود، فإن هناك في الواقع حَدّاً يفْصِل بين داخِل الثقب وخارجِه. هذا الحدُّ، ويُطلقُ عليه **أفُقُ الأحْداث**، هو عِبارةٌ عن كُرَة خيالية (لا وجودَ مادِّيَّ لها) يُساوِي شعاعُها شُعاعَ شوَارزشِيلد. وهُو يرسُم ويحدِّد منطقةً من الكون يستحيلُ استحالة تامةً التواصُلُ معَها، أي أنه يتعذَّرُ تلقِّي أي رِسالة آتيةٍ من هذه المنطقة كما يتعذَّر معرفةُ ما يجري فيها.



الثقب الأسود

هذه الخُطاطة المبسَّطة لا تبيِّن تقوُّس الزَّمَكان داخلَ الثقبِ الأسود وفي جواره.

ولكي نوضِّحَ الأثرَ الذي يحْدِثه أفُقُ الأحداث هذا، لنتصوَّرْ مسباراً آليّاً يَغُوص داخل ثقبٍ أسودَ مُصْدِراً إشاراتٍ ضَوْئيةً زرقاء اللون (في شكل وَمضاتٍ) يُطْلِقها صوبَ مركبة فضائية تقَعُ على

مسافة بعيدة منه. إنَّ ركابَ المركبة سيُخيَّل إليهِمْ أن المِسبارَ يقترِبُ ببطءٍ أشدَّ فأشدَّ من أفق الثقب الأسود من دون أن يبلُغَ به الأمرُ البتة إلى تخَطِّيه. وسَيبدُو لهم أيضاً أن المجالَ الفاصل بين إشارتين متتاليتَيْنِ يمتدُّ ويتَّسِع أكثر فأكثر إلى أن يبلُغَ طولاً لا حدَّ له عندَ وُصول المسبار إلى الأُفُق.

وفي الآن ذاته، يحدُثُ تغيرٌ في لوْن الإشاراتِ الضَوْئيةً التي تتلقَّاها المركبة: فبعد أن يكون لونُها أزرقَ في البداية، يصير أخضرَ، فأصفرَ، فأحمرَ، ثم يختفي تماماً. عندئذٍ يأتي دورُ أدواتِ الاستكشاف في المركبة لتلتقطَ الإشارات في نطاق الأشعة ما تحت الحمراء، ثم في نطاق الراديو. ثم تنْطفِئُ الإشاراتُ تماماً. أمَّا المسبار، فلا يكادُ يَمْضِي جزءٌ من ثانية على تجاوُزِه الأفقَ حتى يحدُث اصطدامُه المحتومُ بالفرادة.

إن الإشاراتِ الضَوْئيةً المنبَعِثة من المسبار هي

أشبَهُ ما تكون بدقّاتِ الساعة. وحينَ يقومُ رُكاب المركبة بملاحظةِ هذه الإشاراتِ، فإنهم يقارِنون إدراكَهُم للزمن، **زَمنِهم الخاص**، بالزمن الذي يمضي ظاهريّاً على متن المسبار، ويُسمَّى **الزمنَ الظاهر**. والحال أن الزمن الظاهر، من منظور النسبية العامة، يَمضي بكيفيةٍ تزدادُ بُطْأً كلما اقتربنا من شيءٍ ضَخمِ الكتلة. ومن ثم يخيَّلُ إلى الركاب أن كلَّ شيء في المسبار يسير ببطءٍ أشد فأشدَّ. وبالمقابِل، فعلى متْنِ المسبار، يكون إدراكُ زَمنِ السقوط في الثقب الأسود مُتطابِقاً معَ إدراكِ الزمن الخاص، وهو إدراكٌ لا يؤثِّر فيه بتاتاً قُرْبُه من الشيء الضخم.

ويُصطلَحُ بعِبارة الاحمرار الجاذبي على ظاهرةِ تغيُّر ضوءِ المسبار وانتقالِه إلى اللون الأحمر. إنها نتيجةٌ مباشِرةٌ لما يَقوم من فرقٍ بين الزمنِ الخاص والزمن الظاهر. ويُمْكن شرح هذه الظاهرة على النحو الآتي: يشكل تغيُّرُ اللونِ تغيُّراً في تردُّدِ

الإشْعاعِ الضوئي، أي في عدد اهتزازات الحقل الكهرومغناطيسي التي تتِمُّ في الثانية الواحدة. والمُلاحَظ في المجالِ المرئيِّ، أن أعلى التردُّدات جهةَ اللونِ الأزرق تقعُ فيما تقَعُ أدناها جِهَة اللون الأحمر. إن الضوء ينبعِثُ من المسبار بعدَدٍ من الاهتزازات في الثانية يطابِق اللون الأزرق، لكن بما أنَّ الثانية الواحدةَ من الزمنِ الظاهر على صَعيدِ المسبار هي أطوَلُ من نظيرتِها في الزمن الخاص على صعيد المركبة، فإن رُكّابَ هذه الأخيرة يتلقَّونَ ضوءاً مُحمرّاً. وعلى صعيد أفُقِ الثُّقبِ الأسودِ، يصيرُ الاحمرارُ غيرَ متناهٍ، أي أن الإشارات تصبح خَفيَّةً لا تُرى.

فيمَ تختلفُ الثقوبُ السوداء عن النجومِ السوداء؟

لقد مرَّ بنا أن النجمَ الأسود هو نجمٌ تفُوقُ سرعةُ

التحرر لديه سرعةَ الضوء. وهذا يقتضي ضمنيّاً وجودَ قوَّة جَذبٍ شديدةٍ بما يكفي على السطح، أي، في حالةِ نجمٍ ذِي كتلة معينة، أن يكونَ شعاعُ هذا النجم صغيراً بما يكفي.

ومتى قُمنا بعمليةِ حسابٍ وفق جاذبية نيوتن، اتَّضح لنا أن الشعاع يكون على قدْرٍ كافٍ من الصِّغَر إذا كان أقلَّ ... من شُعاعِ شوَارزشِيلد أو مُساوِياً له!

قد يذهبُ المرءُ إلى الظنِّ أولَ وهلةٍ أن هناك توافُقاً بين نظريتَيْ نيوتن وأينشتاين بما أن كلتَيْهِما تتنبآن بوجودِ الأشعة الحَرجة نفسِها لدى النجومِ السوداء ولدى الثقوب السوداء سواءً. إن سلوكَ هذا المسلك يعني الجهلَ بأنَّ جاذبية نيوتن تُقدِّم بوجه عامّ وصْفاً غير صحيحٍ لهذه المسألة؛ إذ يمْكِن أن يكونَ للنجمِ الأسود شعاعٌ أصغَرُ من شُعاعِ شوَارزشِيلد الخاصِّ به وألا ينعكس عليه ذلك سلباً، بينما تتنبَّأُ النسبية

العامة بانهيارٍ هذا النجم انهياراً لا مَناصَ منه. ومن جانب آخر، فإن الفوتوناتِ المنبعِثةَ من سطحِ النجم الأسود تستطيعُ ولا شكَّ أن تخرُجَ من المنطقة المحدَّدةِ بشُعاعِ شوَارزشِيلد (أي من أفق الأحداث في النسبية العامة) باتِّباعِها مَساراتٍ اهلِليجِيَّة تَعودُ بها مرّة أخرى جِهةَ السطح. هكذا، فلا حائلَ يحولُ من دونَ التقاط الضوء المنبعِثِ من النجم شريطةَ أن يُوجَدَ الملتقِط على مسافةٍ قريبة بما يكفي من النجم. على النقيض من ذلك، تقضي النسبية العامة بأنْ لا شيءَ بوُسعِه أن يَخرجَ من الثقب الأسود. إنَّ مَغزَى هذه القصة هو أن لا وجودَ للنجوم السوداءِ بحُكمِ أنَّها ثمرةٌ آتيةٌ فحسبُ مِن نظريةٍ طُبِّقتْ خارج حدود صَلاحيَّتِها.

كيف تتكوَّن
الثقوب السوداء؟

إن اهتمامَ علماء الفيزياء الفلكية بالثقوب السوداء هو اهتمام نابعٌ من انصرافِهم إلى دراسة ظاهرة موْتِ النجوم، علماً أن لفظ «الموت» يُوحي هنا إيحاءً شِعريّاً إلى الحالة النهائية التي تَؤول إليها النجومُ حين تتوقفُ عن اللمعان بعد أن تستنفدَ زادَها من الوقود. وبخصوص نجم يوجَد معزولاً، تحدِّدُ هذه الحالةَ النهائية أساساً كتلتُه الأولية. ويتم التمييزُ بين ثلاثِ حالاتٍ تخصُّ الكتلة الأولية: أولاً، أن تكون أكبرَ من كتلة الشمس ثمَاني مراتٍ (أو كما يُقال: بِثمَاني كُتَلٍ شمسية)؛ ثانياً، أن تكون أكبرَ من ثَماني كُتَلٍ شمسية وأصغرَ من خمسٍ وعشرين كُتْلةً شمسية؛ ثالثاً، أن تكون أكبرَ من خمسٍ وعشرين كُتْلةً شمسية. إن الحالة الأولى هي

حالةٌ تميّزُ النجمَ القزَميَّ الأبيض، كما سنفصِّل القول في ذلك بعد حينٍ، بينما ترتبِط الحالة الثانية بنجم ذي نوترونات؛ وتقود كلُّ القرائنِ إلى الاعتقاد أن الحالة الثالثة تَنطبقُ على الثقبِ الأسود.

إن النجومَ هي عِبارة عن كُراتٍ مؤلَّفةٍ من غازاتٍ حارَّةٍ، وهو ما يجعَلُ منها أشياء مُضيئة. ويتمثَّلُ مصدرُ حرارتِها في **الانصهار الحراري النووي**، حيث تكون درجة الحرارة داخل النُّجومِ من الشدة بحيث تنصهر بعض العناصر الخفيفة، كالهيدروجين أو الهِيليوم، لتصير عناصرَ ذاتَ طبيعةٍ أثقلَ كالكربون أو الأكسجين. ويتَّضِح أن هذه التفاعلاتِ تحرِّر كمِّياتٍ هائلةً من الطاقة تؤدي إلى احترار النجوم. وتحت تأثير الحرارة، تشرع النجوم في التمدُّدِ، وهي تكونُ معرَّضةً للانفجار لو لمْ تخضعْ للانضِغاطِ بفعلِ الجاذبية التي تعمَلُ عملَها في الوقت نفسه بين مُختلِف أجزائها. صفوةُ القولِ

إذن أن النجمَ هو شيءٌ يوجد في حالة من التوازن، وتعوِّضُ فيه الجاذبيةُ ضغطَ الغاز وتُوازِنُ مفعولَه.

والملاحَظ في تفاعُلات الانصِهار أن العنصرَ المُركَّب كلَّما كان أثقلَ (فالكَربون أثقلُ من الهِيليوم، والهِيليوم أثقلُ هو الآخرُ من الهيدروجين)، كان للتفاعلِ احتياجٌ أكبرُ إلى درجةٍ من الحرارة مُرتفعة. فالنجومُ تقوم في مُعظم فتَراتِ حياتِها بصَهْر الهيدروجين وتحويلِه إلى هيليوم. وعندما ينْعدِم الهيدروجين، تهبِط درجة الحرارة لأمدٍ محدَّدٍ، الأمر الذي يترتَّب عنه انخفاضٌ في ضغط الغاز.

آنذاك تصبحُ الغَلَبَةُ للجاذبية فلا تلبثُ أن تُحْدثَ انقباضاً وتقلُّصاً في قلبِ النجم، بحيث تؤدِّي مجدَّداً إلى ارتفاعِ درجةَ الحرارةِ بقدرٍ يكفلُ انصهارَ الهِيليوم وتحوُّلَه إلى كَربونٍ. وفي الوقتِ نفسه، تبلغُ الطاقةُ التي تحرَّرت من قلبِ النجم مبلغاً من القوَّة والشدَّة يجعلُها تنسِفُ الطبقاتِ العليا.

وفيما يتصل بنجم كالشمس، تتوقَّفُ تفاعلاتُ الانصهارِ حين يكونُ الهيليوم قد استُهلكَ كلُّه، لأنَّ قلبَ الكوكب ليس ذا كتلة كبيرةٍ بما يكفي لكي يحْدُثَ تقلُّصٌ جديد يتيحُ انصهارَ الكربون. من سِمات القلبِ آنئذٍ أن يكونَ شديدَ الحرارة والتَّراصِّ في ذات الآن، حيث إنه يضمُّ نصفَ كتلة الشمس داخلَ حَجم شبيهٍ بحَجم الأرض، أي نَحْو طنٍّ في السنتيمتر المكعَّبِ! وعند هذا المستوى من الكثافة، لا يبقى ضغطُ الغاز بالمعنى التقليدي هو الذي يُعوِّض الجاذبيةَ ويوازِن مفعولَها، بل يقومُ بذلك ضغطٌ من أصلٍ كمّيٍّ تمارِسُه الإلكترونات ويشار إليه بعبارة **ضغط الانحلال**. بتعبير مختصَر، تُبدي الإلكتروناتُ مقاوَمةً لا حدَّ لها تقريباً إزاء كلِّ ضغطٍ يتخطَّى حدوداً معينة، كما لو كانتْ عبارةً عن كراتٍ صلبةِ المَلمسِ صلابةً لا متناهية. وقد حدَثَ خلال بضعِ عشراتٍ من آلاف السنين

أن تلاشَت في الفضاءِ الطبقاتُ الخارجية التي قذَفَ بها الكوكبُ تلاشياً أتاحَ ظهورَ القلب، الذي أطلِق عليه اسمُ **النجمِ القزَميّ الأبيض**. والحال أنَّ هذا النجم ما انفكّ يبْرُد رُوَيداً رويداً، ما يجعل منه شيئاً يَخبُو نورُه أكثر فأكثر.

وبخصوص نجم يُساوي على الأقل ثماني كُتَل شمسية، تتواصَلُ تفاعلاتُ الانصهار وتتلاحقُ متجاوِزَةً انصهارَ الهيليوم وتحوُّلَه إلى كربون: فبِالانصهارِ يتحولُ الكربونُ إلى أوكسجين، والأوكسجينُ إلى نَيون، والنيونُ إلى مغنيزيوم، والمغنزيومُ إلى سيليسيوم، وأخيراً يتحَوَّل السيليسيوم إلى حديدٍ. وكلَّما كانت العناصرُ أثقلَ، تمَّ تركيبُها داخل طبقاتٍ أشدَّ حَرارةً وعُمقاً، وأدَّى انصهارُها إلى تحريرِ كميةٍ أقلَّ من الطاقة. ويشكِّل الحديدُ من هذا المنظورِ الحدَّ الأقْصى حيثُ إن انصهارَه لا يحرِّر أيَّ طاقة. وحيث إن نسبةَ الحَديد تتزايدُ في

قلبِ النجمِ، فإن درجة الحرارة تقلُّ فتصيرُ أضعَفَ من أنْ تمكّن ضغط الغازِ من مقاومة الجاذبية، فيحدُثُ جرَّاء ذلك انهيارٌ كارثيٌّ للنجم على نفسِه. وإذا بمادَّة القلبِ تبلُغ فجأةً درَجةً من الكثافة تجعلُ نُوى الذَّرّات تنْحَلُّ وتتجزَّأُ إلى مكوِّناتِها الأولية من برُوتُوناتٍ ونُوترُوناتٍ. وتحت تأثير الضغط، تقوم البرُوتُوناتُ بامتصاصِ الإلكتروناتِ مكوِّنةً بذلك مزيداً من النُوترُوناتِ. ويتواصلُ الانضغاطُ بلا انقطاعٍ إلى أن تتماسَّ النُوترُوناتُ فيما بينها مُحدِثَةً كثافةً خارقة تعدادُها مليونُ طنٍّ في السنتيمتر المكعَّب. وعند هذه المرحلة، تمارِسُ النُوترُوناتُ، شأنُها شأنُ الإلكتروناتِ، ضغطَ انحلالٍ يوقِفُ زحفَ الانضغاطَ بكيفية حادَّة ويُحيلُه إلى انفجارٍ عنيفٍ مُهْوِل يُصطَلح عليه بمُسمَّى **سوبرنوفا** supernova أو المُستَعِر الأعظَم. وإذا بذلكَ الانضغاط، الذي لم يكدْ يستغرق من الزمنِ أكثر

من ثانية، يتسبَّبُ في وُقوعِ أحدِ أقوى الأحداثِ وأشدِّها امتلاءً بالطاقةً في الكونِ: فخلال أيامٍ قلائلَ، يُصبح السُوبِرنوفا منافساً ينافِسُ على صعيد الإشعاعِ الضوئي المجرَّةَ التي تستضيفُه (لنذكُرْ أن المجرَّة هي مجموعة شاسعة من النجوم المترابطة جاذِبيّاً). والحالُ أن السُوبِرنوفا لا يدمِّر النجمَ بأكملهِ إذ إنَّ القلبَ المتراصَّ، ويُسمَّى **النجم ذا النُوترونات**، يستمرُّ في الوجودِ بعدَ الانفجار. يتعلق الأمر بكُرةٍ من النُوترونات يصِل وزنها إلى مائة مليون طنٍّ ولا يتجاوَزُ قُطرُها العشرين كيلومتراً، أي أن كثافةَ المادَّةَ فيها تفُوقُ كثافتَها في النجم القزمي الأبيض بمليارٍ من الأضعاف!

ويتَّضِح في ضوء ما وُضِعَ من حسابات نظرية أن ضغطَ انحلال النُوتروناتِ ليس بوُسعِه أن يقاومَ الجاذبيةَ إلا إذا بقيَتْ كتلة النجمِ ذي النُوتروناتِ أقلَّ من نحوِ ثلاثة أضعاف كتلة الشمس (أو أقلَّ من

ثلاث كتل شمسية). بيد أن هذه العتبةَ يتمُّ تخطِّيها في حالة النجوم التي لَها كتلةٌ أوليَّةٌ تفوقُ خمساً وعشرين كتلة شمسيةً. والظاهرُ في هذه الحالة أن ليس ثمة أي آليةٍ فيزيائية معروفةٍ تستطيعُ أن تتصَدَّى للجاذبية إبَّان الانضغاط الذي يسبِقُ انفجارَ السُوبِرنوفا. ولهذا السببِ يعتقدُ الدارسون، خِلال عملية الانضغاط، بحدوث تقلُّصٍ سريعٌ في قلب هذه النجوم ليتَّخذَ شكلَ كُرةٍ لها شعاعٌ أصغرُ من شُعاعِ شوَارزشِيلد، الأمر الذي يعني ولادة ثقبٍ أسودَ. وقد رأينا أيضاً أنه ما إن يتمّ تخَطِّي هذه العتبةِ الحرجة حتَّى يستمرَّ التقلص ويتواصلَ إلى أن توجَدَ المادَّةُ كلُّها مُنضغِطةً داخلَ حجم منعدِم. خلاصةُ القولِ إن ثمَّةَ على الأقل سيرورةً فيزيائية فلكية تنشَأُ عنها على الأرجحِ الثقوبُ السوداءُ، وهي موتُ النجوم الضخمة.

هل يُمكن رؤية ثقبٍ أسود؟

تُصدِرُ النجومَ القزميَّةَ البيضاءَ من الضَّوءِ ما يكفي لكي يظهرَ شكلُها على الصوَرِ التي يلتقطُها المنظارُ. وقد لوحِظ الكثيرُ من هذه النجوم، ما يجعلُ وجودَها أمراً لا يُنكِرُه مُنكِر. أما النجومُ ذات النُوتروناتِ، فَنُورُها أضعَفُ وأخْفَتُ من أنْ يُرَى مباشرة بالعين المجردة؛ بيد أن زُمرةً كبيرةً منها تُصْدِرُ مَوْجاتِ راديو ذات طابع خاصٍّ.

وماذا عن الثقوب السوداء؟ هل هناكَ من أملٍ في إثباتِ وجودِها عن طريقِ القيام بعملياتِ ملاحظة؟ أجَلْ، هناك أملٌ. فمتى ظلَّ الثقب الأسودُ غير معزولٍ تماماً، أمكنَ أن يَشِيَ بوجودِه محيطُه القريبُ. يتعلق الأمرُ إذن بظهورٍ يتَّخذُ شكلاً غيرَ مباشر.

أقراصُ التضَخُّم أو
«طَعامُ الثقوب السوداء النَّهِمة»

إن النسبية العامة، متى تَمَوْضعَتْ خارجَ أفقِ الأحداث، هي نظرية لا تختلف إلا اختلافاً جدَّ طَفيفٍ عن جاذبية نيوتن، بحيث يَغدو من المشروعِ اعتماد هذه الأخيرة كمقاربة أولى. هكذا، فباستعمال لغة نيوتن، يمكن القولُ إن الثقب الأسودَ يمارِسُ قوَّةَ جَذْبٍ على ما يحيط به من أشياءَ. إنها جاذبيةٌ مماثِلة لتلك التي يُحْدثُها نجمٌ له كتلةِ الثقب الأسود نفسها. والمادةَ إذا وُجِدتْ على مقرُبةٍ من الثقب خَضعتْ لقوَّةَ جَذبهِ، ولا يُستبعدُ أن تُنهيَ مَسيرَها في جوفِهِ، وهو ما يؤدِّي إلى تزايُدِ كتلةِ الثقب الإجمالية وتعاظُم جاذبيتِهِ. لنذكِّرْ بأن شعاعَ الثقب الأسود (أي شُعاعَ شوَارزشِيلد الخاصَّ به) هو شعاعٌ يتزايَدُ بتزايُدِ كتلتِهِ، ومن ثَمَّ فإنَّ الثقب الأسود يصيرُ أكبرَ وأضخمَ كلما تَساقَطت المادّةُ

في جوفِه (وليس الأمرُ كذلك في الفرادة المركزية، التي لا تحيدُ عن نقطتها وهيئتِها مهما يحدثْ). إن هذه المعطيات تَجنَحُ بمخيلتِنا إلى أن تصوِّرَ لنا الثقوبَ السوداءَ وكأنها نجومٌ نَهِمَة تفترسُ المادّةَ افتراساً.

الملاحَظ أنه عندما يبتلعُ ثقبٌ أسوَدُ كمِّيةً من المادة، فإن هذه تهوي إلى داخل الثقب في حركةٍ لَوْلبيّة. وإذا كانت الكمية كبيرة، يتشكلُ حولَ الثقبِ غِشاءٌ من المادة يُسمَّى **قُرْصَ التضخُّم**. وتعرفُ جزيئاتُ المادة أثناءَ سقوطِها سُرعةً فائقة كما يحدث بين بعضُها بعضاً احتكاكاتٍ قوية. يترتَّبُ عن ذلك ارتفاعٌ كبير في درجة الحرارةِ داخل القرص، وهو ارتفاعٌ ينجُمُ عنه انبعاثٌ للضوء في شكل أشعة سينية كثيفةٍ يَسهُل ملاحظتُها. أضف إلى ذلك أن أقراصَ التضخم غالباً ما تُصاحِبُها دفعتان اثنتانِ من المادة المقذوفة واقِعتانِ في جِهتَيْ الثقب بكيفية متعامِدة مع القرص. وحريٌّ بنا أن نلاحظَ أن المادة

الملفوظةَ في الدفعتيْن لا تأتي من جَوْف الثقب (إذْ لا شيء يمكنُه أن يخرج منه)، بل من قُرْص التضخُّم.

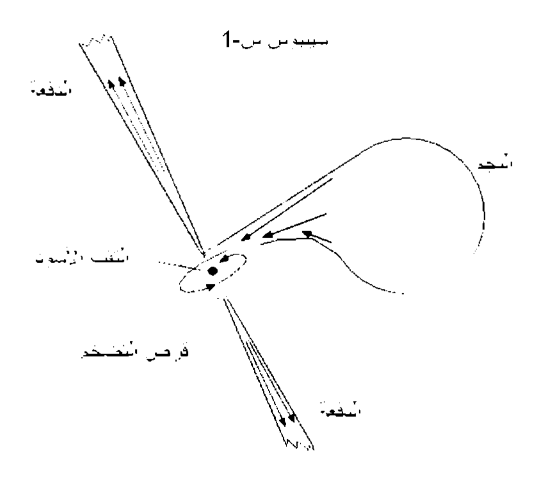
نُظُمٌ ثنائية أو «رفقاء يتمُّ التهامُهم»

تشكِّل حالة النظام الثنائي المرصُوص أبلغَ الحالات وأشدَّها إقناعاً في باب انبعاثِ الأشعَّة السينية المنسوبَة إلى الثقوب السوداء. لنُمعِنِ الآن النظرَ في هذه المسألة. إن الثلثين على الأقلِّ من النجوم تولَد وتتطوَّرُ في أزواجٍ مترابطة جاذِبِيّاً. لنتصوَّرْ زوجاً مؤلَّفاً من نجمَيْن لهُما كتلتانِ متبايِنتان. فالأكبرُ منهما سيتطورُ بوتيرة أسرعَ بكثيرٍ وسينشأُ عنه ظهورُ ثقبٍ أسود، بينما سيستمِرُّ النجمُ الأصغر في صَهْرِ ما يَحويه من هيدروجين بكل هدوء. ويُلاحَظ في النظام المرصوص أن النجمةَ الرفيقة تقعُ من الثقبِ الأسودِ على مَسافة قريبة يتسنَّى لهُ بها أن ينتزِعَ منها الغازَ عن طريق قوة الجذب. وسَرعانَ ما

يشكِّل هذا الغازُ قُرْصَ تضخُّمٍ ينتِج انبعاثاتٍ سينيةً بالغةَ الكثافةِ.

ومِن منظور الملاحِظ البعيد (أي عالم الفيزياء الفلكية) الذي ليس بمقدورِه أن يَرى النجمةَ الرفيقة، يبقى هناك شكٌّ يحومُ حولَ طبيعة الشيء الذي تَشكَّل حَولَه قُرْصُ التضخُّم. ولا غرابة، فمن شأن النجم ذي النُوتروناتِ مبدئيّاً أن يكونَ هو المقصودَ مَثَلُه مثلُ الثقب الأسود. إن الفائدة الكبرى التي تقدِّمُها النُّظمُ الثنائية تكمُن في كونِها تتيحُ قياسَ كتلةِ الشيءِ غير المرئيِّ عن طريق ملاحظة الحركةِ الدَّوْريةِ المنتظِمة التي يتَّبعُها رفيقُه النَّجمي. بعد ذلك يُمكن عقدُ مقارنة بين الكتلة المَقيسَة وبين الكتلة النظرية القُصوى التي يَشتمِلُ عليها نجمٌ ذو نُوتروناتٍ، والجزمُ آنئذٍ بوُجودِ الثقب الأسود أو بعَدَم وجودِه. ففيما يتصل بالنظام الثنائي «سينيوس س–1» Cygnus X–1، استطاعَ الدارسُون أن يبيِّنُوا

كيف أنَّ كتلة الشيءِ غير المرْئيِّ تَفوقُ ثلاثَ كُتلٍ شمسية. ويترتَّب عن ذلك أن الرفيقَ لن يكونَ شيئاً آخرَ غيرَ ثقبٍ أسود.



نوى المجرّة النشيطةُ والثقوبُ السوداء ذات الكتلة الهائلة

لقد تمَّ أيضاً رصْدُ عمليات انبعاث سينيةٍ كثيفة آتيةٍ من مركزٍ بعض المَجرَّات، وهو مركزٌ اصطُلِح عليه بعبارة: نواة المجرَّةِ النشيطة. وتتغيَّرُ عمليات الانبعاث هذه على مدى فَتَراتٍ هي من القِصَر بحيثُ يصيرُ لزاماً أن تكونَ المناطقُ التي تأتي منها صغيرةَ الحَجم جِدّاً. لكن كيف تأتَّى التيقُّنُ من ذلك؟ الواقع أنهُ لوْ نَشَأتْ الأشعةُ السينية في منطقةٍ مترامية الأطراف لوجَبَ أن يستغرِقَ كلُّ تغيُّرٍ يحدُث في نقطة من هذه المنطقة مدَّةً زمنية معيَّنةً كي يصلَ إلى النقاط الأخرى، وأن يحدثَ هذا في سياقِ انبعاثٍ شاملٍ تَفُوق مُدَّتُه تلك المدة التي تمَّ رصدُها. تَصوَّرُوا فرقةً موسيقيةً يوجَدُ عازِفُوها جدَّ متباعِدين فيما بينهُم: يَشرَعُ عازِفُو الكَمانِ في العَزف، لكن حينَ يَتناهى لحْنَهُم إلى سمعِ أصحابِ

الآلات النافِخة، يكونُ لدى هؤلاءِ تأخُّرٌ في الإيقاع لا محالةً: إنَّها الفوضى! هكذا فإذا كان الموسيقيون يعزِفون معاً بكيفية متزامِنة، فإنَّما ذلك لأنَّهم يوجَدون جنباً إلى جنبٍ.

وحَريٌّ بنا أن نشيرَ من جانبٍ آخرَ إلى أنَّ كتلةَ المنطقة المُصْدرِة للانبعاثاتِ – وهي تتراوحُ بين الملايين والمليارات من الكتل الشمسية – هي كتلةٌ هائلة قياساً إلى حَجمِها، الأمر الذي يعَضِّد فكرةَ وجودِ ثقبٍ أسود. وتوسَمُ هذه الثقوب، بالنظر إلى هيئتها العملاقة، بعبارة «ذات الكتلة الهائلة» «supermassifs» أو بصِفَة «المجَرِّيَّة» «galactiques».

وهي تقترِن في بعض الحالات بدفعاتٍ من المادة الملفُوظة كما هو حالُ الثقوبِ السوداء التي تتكوَّنُ إثرَ اندثار النجوم الضخمة، والتي يُصطَلَح عليها من باب التشبيه بعبارة «الثقوب السوداء

النَّجمِيَّة». صفوة القول إن السَّيرُوراتِ التي تجري على مَشارِفِ الثقب الأسودِ المركزيِّ هي سيروراتٌ تقدِّمُ تفسيراً مقنِعاً لما يُلاحَظ داخل «نُوَى المجرَّاتِ النشيطة» من فَيْضٍ للطاقة لا يخطُر ببالٍ.

لكن كيف يتأتَّى أن يظهرَ ثقبٌ أسودُ تبلُغُ كتلتُه مليوناً من الكُتَل الشمسية؟

أحد التفسيرات الممكِنَة هو أن قَلبَ المجرَّات يتَّسِمُ بوجود النُّجوم بكثافةٍ كبيرة تعدادُها نحوُ مليونِ ضِعفٍ مقارنةً مع كثافتها قُربَ الشمس. وتتميَّزُ أكبرُ هذه النجومِ وأضخَمُها كتلةً بكوْنِها تتطورُ بسرعةٍ أكبرَ وتُفضي إلى ولادة ثُقوبٍ سوداءَ. وإذا بهذه الثقوبِ تستغلُّ المادَّةَ الغزيرة الموجودةَ في محيطِها (من نجومٍ وغازٍ وغُبارٍ وغيرِها) فتنمُو وتتضخَّم بسرعة، ثم تنصَهِر فيما بينها لتولِّد ثُقوباً سوداءَ أكبر فأكبرَ، تنمُو بوتيرةٍ لا تزيد إلا تَسارُعاً، وهكذا دواليك.

«ثقبُنا» الأسوَد المجرّي

هناك اعتقادٌ بأن المجرَّاتِ النشيطةَ ليستْ هي وحدَها التي تحوي في مركزِها ثقباً أسودَ ذا كتلة هائلة. فأغلبُ الظنِّ أن ثمَّة مجرَّاتٍ اشتهرَتْ بكونها هادئة، مثل مَجرَّتِنا، لكنها تشتمل مع ذلك على هذه «الغيلانِ». وقد أنجِزتْ خلال العِقدِ الأخير مُلاحظاتٌ رائعةٌ أتاحتْ قياسَ حركةِ النجوم حولَ مركزِ مجرَّتِنا قياساً دقيقاً. واتَّضَح أن هذه النجومَ ترْسُم مساراتٍ إهلِيلجِيَّةً حول شيء غيرِ مرئيٍّ أطلِق عليه اسمُ «ساجيتاريوس أ×» Sagittarius A×، تقدَّر كتلته بـ 3,7 مليون كتلة شمسية، بينما لا يتعدَّى حجمُهُ عشرة أضعافِ المَسافةِ القائمة بين الأرض والشمس، أي 1500 مليون كيلومتر. وهناك يقينٍ شبْهُ تامٍّ بأن الأمر يتعلق بثقبٍ أسودَ ذي كتلةٍ هائلة. وعلى الرغم من كتلتِه الضخمة، إلا أنه يبقى شيئاً صغيراً إذ إن حَجمَ أفقِ أحْداثِه يُقدر بِحواليْ

خمسين جزءاً من المَسافةِ الفاصلة بين الأرض والشمس، أي ثلاثة ملايينَ كيلومتر.

هل يشكِّلُ «ساجيتاريوس أ×» إذن تهديداً للأرض؟ إذا علِمنا أن المنظومة الشمسية تقعُ على مسافةٍ تناهزُ 25000 سنة ضوئية (أي 250000 بليون كلم) من مركزِ المجرَّة، فإنه يجُوز لنا أن نتيقَّنَ من أنَّ «ساجيتاريوس أ×» لا يشكل أيَّ خطر مباشرٍ علينا! قد تكونُ هناك ثقوبٌ سوداءُ ذاتُ حجم نجميٍّ في الضاحية القريبة من المنظومة الشمسية، غير أنها تبقى بعيدةً مسافاتٍ لا يُستهانُ بها، سِيَّما وأنَّ أقربَ نجمٍ من الشمس، وهو برُوكسيما السَّنتور أو النجمةُ الدنيا Proxima du Centaure، يبعُدُ عنها بأربعِ سنوات ضوئية (أي ب 40 بليون كلم). وفضلاً عن ذلك، فقوةُ الجذبِ التي يمارِسُها ثقبٌ أسوَد نجميٌّ تُماثِل تلك التي يمارسُها النجمُ الأوليُّ، مما يعني أنها لا تحمِل أي خطر. ومع أن الثقوب

السوداءَ تتسِم بجانبٍ يجعلُ منها ما يشبه «السفَّاطة كونية»، إلا أنه ليس ثمَّةَ ما يدعو إلى التوجُّس والخشية من اختِفاءِ كوكبِنا في الغدِ القريبِ داخلَ جوفِ أحدِ هذه الغِيلانِ.

مَوْجات الجاذبيَّة
أو اهتزازاتُ الزَّمَكان

تنصُّ جاذبيةُ نيوتن على أنَّ القوةَ التي تمارسُها كتلةٌ ما تؤثِّر تأثيراً فوريّاً في الكتل الأخرى أيّاً كانت المسافة التي تفصِل بينها. فلو حدثَ مثلاً أن اختفَتِ الشمسُ فجأةً، فإن الأرض ستغادِرُ على التوِّ مدارَها الإهْلِيجيَّ!

على النقيض من ذلك، تقضي النسبيةُ العامة بأن الجاذبيةَ تنتشر بسُرعةِ الضوء. هكذا فالأرضُ لن تغادرَ مَدارَها إلا بعد مُضيِّ ثماني دقائقَ على اختفاء الشمس لأنَّ الضوء المُنبعثَ من سطحِ الشمسِ يلزمُه

ثماني دقائقَ كي يصلَ إلى الأرض. ومن منظورٍ أعمَّ، حين يحدُث تغيُّرٌ ما في توزيعِ الكتلة، فإن هندسةَ الزَّمَكان لا تلبثُ أن تُجارِيَ هذا التغيُّر و تتلاءمَ معه. ويُطلَق على هذا التلاؤمِ الذي ينتشِر بسُرعةِ الضوء اسم **مَوْجات الجاذبيَّة**.

إنها موجاتٌ لم يتمَّ بعدُ الكشفُ عنها على نحوٍ مباشِر، لكنَّ وجودَها أمرٌ قدْ تمّتْ إقامةُ الدليلِ عليه بكيفية غيرِ مباشرةٍ من قِبَل الباحثَيْنِ جوزِيف طايلور Joseph Taylor وراسل أ. هولس Russell A. Hulse، اللذيْن حازا على جائزةَ نوبل عام 1993 بفضلِ هذا الإنجازِ[5].

(5) – جوزِيف طايلور (1941–) عالِم أمريكي تخصَّص في الفيزياء الفلكيَّة.

– راسل أ. هولس (1950–) فيزيائي أمريكي معاصر متخصص في موجات الجاذبية. وقد حاز الاثنان هذه الجائزة تحديداً بفضل «اكتشافهما نوعاً جديداً من البولسار (وهو نبع إشعاعي راديو فلكي)، وهذا الاكتشاف يفسحُ السبيل أمام آفاق جديدة في دراسة الجاذبية.

ومتى توافرتْ لدينا أجهزةُ كاشفةٌ لهذه الموْجاتِ، أضْحَى بوُسعِنا أن نلاحِظَ بعض الأحداث التي لا تخلُو من طابَعٍ كارِثيٍّ مِثلِ ابتلاعِ نجمِ ذي نُوترونات من قِبلِ ثقبٍ أسوَدَ، أو انصهارِ ثقبيْن أسودَيْنِ. إن صناعة مثل هذه الكواشِفِ هي مَهمَّةٌ في طور الإنهاءِ بأوروبا (من خِلالِ مشروع فيرغو *Virgo*) والولايات المتحدة (من خِلالِ مشروع ليغو *Ligo*). ويتبيَّنُ أنَّ مُرورَ مَوجةٍ جاذبيةٍ هو أمرٌ يؤدِّي مبدئيّاً إلى تمديدِ الفضاء في اتجاه معيَّنٍ وإلى تقليصِه في الاتجاه المتعامِد معه. ومن ثَمَّ، فإنَّ كواشِفَ مَوْجات الجاذبيَّة تتكوَّن من ذِراعيْن متعامِدينِ يُقاسُ طولُهما بَصَريّاً بدقَّةٍ خَيالية. لعلَّكم ستتصوَّرُون صُعوبةَ هذه المأمورية – أو لا تتصوَّرُونَها– إذا قلتُ لكم إن ما يُسبِّبُه انصهارُ الثقبين الأسوَديْن من تغيُّرٍ نِسبيٍّ في طول الذراعينِ لا يتعدَّى قيمة زهيدة هيَ ٪ . 10^{19}

وباستعمال كاشفٍ واحدٍ سيَكونُ من الصعب

تحديدُ الوِجْهة التي تأتي منها الموجةُ المكتشَفَة (يتَّضِح من هذه الزاوية أنَّ كشفَ موْجاتِ الجاذبية هي عمليةٌ أقربُ إلى السمْعِ منها إلى البَصَر)؛ لكنَّ الجمعَ والتَّوْليفَ بين الإشاراتِ المسجَّلة من قِبَل كواشِفَ عِدّةٍ (فريغو وليغو مثلاً) قدْ يُمَكِّن عن طريق التثليثِ من تقدير الموقعِ الذي تَصدُر منه الموجةُ في السماء. إن هذهِ الأدواتِ لكفيلة، إن هيَ وَفتْ بما تعِدُ بهِ، بأن تيسِّرَ لنا أن نفتحَ عمَّا قريبٍ نافذة على الكونِ لم يَكنْ لَنا بِهَا عهدٌ من قبلُ، مَعَ ما ينطوي عليه ذلك من اكتشافاتٍ مُثيرةٍ.

هلْ توجَد أنواعٌ عدّة من الثقوب السوداء؟

إنَّ الثقوب السوداء هي أشياءُ غايةٌ في البَساطة من الناحية النظرية. فمَعَ أنَّ الثقبَ الأسوَدَ هو في أَصلِهِ شيءٌ ذو بنيةٍ معقَّدةٍ، إلا أن كلَّ الأمورِ تغدو في مُنتَهى اليُسر والبساطةِ بعدَ تكوُّن هذا الثقبِ. ذلك أنَّ السِّماتِ المميِّزة للشيءِ الأولي (كالشكلِ أو وجودِ الحقل المغناطيسيِّ أو غيرِهما) تختفي من غير أن تتْرُكَ وراءَها أيَّ أثرٍ. هذه الخاصِّيةُ نَجِدُها ملخَّصةً في جملة الباحث جون ويلر التي لا تخلُو من لَبسٍ وغُموض: «ليسَ للثقبِ الأسودِ شَعَرٌ»، حيث يشيرُ لفظ الشَّعرِ إشارةً مَجازيةً إلى كلِّ ما قد يَنمُّ عن خاصيةٍ يتميَّزُ ويتفرَّدُ بها الثقب الأسْودُ. لنلاحظْ أنه في ضَوءِ ما نملِكُه من مَعارفَ في حقل الفيزياء الفلكية، يتبيَّنُ أنَّ محيطَ الثقب الأسود قمينٌ

بأن يُخبرَنا عنْ نمَط تشكُّلِه. من ذلك مثلاً أن ثقباً أسودَ يساوي بِضْعَ كتلٍ شمسية وينتمي إلى نظام ثنائيٍّ هو على الأرجَحِ ثقبٌ أسودُ نجميٌّ.

وسواءٌ صَرَفْنا اهتمامَنا إلى نمط تشكُّلِ الثقبِ الأسود أمْ لم نَصْرفْهُ، فإنَّ هذا الثقب تحدِّدهُ تحديداً مُطْلقاً في لحظة معينةٍ مَقاديرُ ثلاثةٌ لا غيرُ.

1- إن كتلةَ الثقبِ الأسود هي التي تحدِّدُ حجمَه، الذي يُقاس بشعاع شوَارزشِيلد الخاصِّ به. لنذكِّرْ بأن الأمر لا يتعلَّقُ بكتلة الفرادة المركزيةِ، التي هي كتلة منعدمةٌ أصْلاً، بل بكتلة المَنطِقةِ التي يَحجُبُها أفقُ الأحداث. وكلما زادَ الثقبُ الأسود ابتلاعاً للمادة، زادت هذه المنطقةُ تضخُّماً واتساعاً.

2- إنَّ اللحظة الحَرَكيَّةُ ترتبط بسُرعة دَوَرانِ الثقبِ الأسود حول نفسِه. وهذا مقدارٌ يستمرُّ ويبقى في مجال الفيزياء. ومن ثم فإذا

تكوَّنَ الثقبُ الأسود انطلاقاً من مادَّة في حالة دورانٍ، فإنه سيدورُ لِزاماً هو الآخَرُ حول نفسه.

3– أما الشَّحنة الكهربائية، فهي تشكِّلُ مِقداراً ذا أهميةٍ أقلَّ وأدنى على صعيد الممارسة الفِعلية، ذلك أنَّ حظوظَ العثورِ على ثقب أسودَ مَشحونٍ كهربائيّاً هي حظوظٌ ضئيلةٌ لأن هذه الشحنةَ سَرعانَ ما سينالُ مِنها الوسطُ المحيطُ بالثقبِ ويُبطِل مفعولَها. لذا ارتضَينا أن نَدَعَ جانباً السِّماتِ الخاصَّةَ بالثقوب السوداء المشحونة.

يخلِّفُ دوران ثقبٍ أسْودَ حولَ نفسه نتائجَ مهمة تؤثِّر في هندسة الزّمَكان المُجاوِر لَه. لقد تناوَلنا بالوصفِ آنِفاً هندسة شوَارزشِيلد التي تُخبِرُنا عن الثقوب السوداء القارَّة. لكنْ إذا كان الثقب الأسودُ في حالِ دورانٍ، فإنَّ هندسة الزَّمَكان التي تنطبِقُ

عليهِ آنئذٍ هي هندسةُ كير، نسبة إلى عالِم الرياضيات النيوزيلَنْدي رُويْ كير Roy Kerr[6]، الذي وضَعَ حِسابَها في الستينيات من القرن العشرين. مَدارُ الأمرِ هنا أن أُفُقَ هذا الثقبِ (الذي يكون كُرَوِي الشكلِ في الحالة القارَّة) يتَّخِذ تحتَ تأثير القوَّة النابِذة شكلاً ممتَدّاً متطاولاً، تماماً كما تصيرُ الأرض مُبَطَّحَة في القُطبَيْن بفعلِ حَركة الدَّوَران التي تخضَعُ لها. وممَّا يثيرُ الدهشة أكثرَ أنَّ الثقب الأسود يجرُّ معه الفضاءَ جرّاً في خِضَمِّ دورانِه مثل دوَّامة عاتيةٍ. وعلى صعيدِ الأفُق، يضطرُّ الفضاءُ إلى الدوران بالسرعة ذاتِها التي يَدُور بها الثقب، بينما يصيرُ دورانُه بطيئاً أكثرَ فأكثرَ كلَّما نَأَى عن الأفق.

(6) رُويْ كير(1934–) : عالِم رياضيات نيوزيلَنْدي ذاع صيتُه ابتداء من سنة 1963، حين توصَّل إلى إيجادِ حلٍّ دقيق لمعادلاتِ النسبية العامّة التي تصِف الثقب الأسود الدوَّار.

ماذا يوجَدُ داخلَ الثقبِ الأسود؟

يَحتَوِي مركزُ الثقب الأسْودِ على ما يُصطلَح عليه بالفرادة. والفرادَةُ هي حسبَ النسبية العامة شيءٌ يضمُّ كلَّ كتلة الثقب الأسْودِ في حَجمٍ منعدم؛ هذا يعني مَبدئيّاً أن كثافتها هي كثافةٌ لا حَدَّ لها، وهو ما لا معنى لَهُ من الناحية الفيزيائية، لعلَّكم لن تُخالِفوني الرأيَ في ذلك. إن المرءَ ليحِسُّ إذنْ إحساساً بيّناً بأن هذا اللانهائي يُخفِي في الواقع خللاً في النسبية العامّةِ، أو لنقُلْ بعبارة أخرى إن شئتمْ إنَّ دراسة الفرادة من منظورِ النسبية العامّةِ هي دراسة تجنحُ، شأنُها شأنُ دراسة النجومِ السوداء وِفقَ جاذبية نيوتن، إلى تَطبيقِ نظريةٍ خارجَ نطاق صَلاحيَّتِها. والحال أنَّ النظريةَ الحديثة التي تضطلع ببَيَانِ ما يجري على صعيدِ ما هو متناهٍ في الصِّغرِ

هي الميكانيكا الكمِّية. أكثرُ الظنِّ أنَّ هذهِ النظريةُ تشكل بدءاً أداةً مُثلى لفهمِ ما تتكوَّنُ مِنه الفرادَةُ (التي لها حجمٌ صغير إلى ما لا نهاية، أو على كلِّ حالٍ حجمٌ صغير «جِدّاً»). لكنها لِسُوء الطالِع لا تُطبَّقُ حين تكونُ الجاذبية على قَدْرٍ كبير من الشدَّة والقوَّة، وهذه هي السِمَة الأخرى التي تَسِمُ الفرادة. ولاستكناه لغزِ الفَرادة، يسعى علماءُ الفيزياء سعياً حثيثاً إلى الجمعِ بين الميكانيكا الكمِّية والنسبية العامة، وهو ما يصطلحُ عليه عادة **بالجاذبية الكمِّية**. إن كُلَّ القرائنِ تَقودُ إلى الاعتقاد أنهم إذا أَصَابُوا نصيباً من النجاح في مَسْعاهُم هذا، فإنَّه ستتحصَّلُ لدينا تلك النظرية الفيزيائية النهائية التي بها سيَتَسنَّى وصفُ الكون وصْفاً شاملاً على الأصعِدة جميعِها. ولَرُبَّما تتجسَّدُ هذه النظريةُ في نظرية الحِبال (أو الأوتار) théorie des supercordes التي يَرُومُ أصحابُها توحيدَ التفاعلاتِ الأسَاسِ (أي الجاذبية

والقوّة الكَهْرُمَغناطيسية والقُوى النوويّة)، لكن الطريقَ ما يزال طويلاً كَيْما يتأتّى التيقُّنُ من ذلك.

ومما يثيرُ الاستغرابَ أنَّ فرادةَ الثقبِ الأسودِ المركزيةَ، وهي شيءٌ يبقى عَصِيّاً على الفيزياء الراهنة، تحتجِب وراءَ أفق أحداثٍ يمنعُنا من رؤيتها دوماً وأبَداً. وهذه الاستحالة التي تنْتَفِي بمُقتضاها ملاحظةُ الفرادة على نحوٍ صريحٍ هي استحالةٌ يُصطلَح عليها بعبارة **مبدأ الحَظْر الكوني**.

هل يمكن السفر بواسطة الثقوب السوداء؟

هل يمكن وُلوجُ ثقبٍ أسود؟

لا حائلَ يَحولُ مبدئيّاً من دون تخطّي أفُق الأحداث من ثقبٍ أسودَ لأنه مجرَّدُ حدٍّ وَهميٍّ. إلا أنه يتوجَّب على المرء أن يكون مستعِدّاً لأداءِ ثَمَنِ هذه المجازَفة لأن سَفرَ العودة أمرٌ مستحيل. أضفْ إلى ذلك أنَّ قُوَّة الجذبِ تصبحُ فورَ الاقتراب من مَشارف الأفق من الشِّدَّة بحيث تصيرُ قُوى المدِّ خَطراً جسيماً يهدِّدُ سلامة أي صاروخٍ استكشافيٍّ وأيِّ رائدِ فضاءٍ يدير دفَّة القيادة. وتُطلَقُ عِبارة **قُوى المدّ** على قوة الجذبِ التفاضُلية التي يمارِسُها جسمٌ ضخمُ الكتلة بين مختلِفِ أجزاءِ شيءٍ من الأشياء.

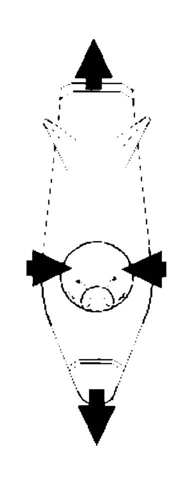
وبتعبيرٍ أبسطَ، بما أنَّ الأجزاءَ المختلفة من الشيءِ الواحدِ لا تنجذِبُ بالقوَّة نفسِها إلى الجسم

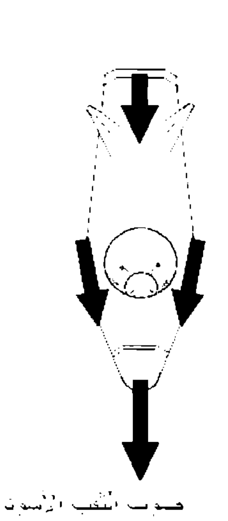
الضخم، فإنه تنشأُ عن ذلك جملةٌ من التوتراتِ تجري داخل ذلك الشيءِ، وتكون كفيلة بأن تشوِّهَ معالِمَهُ، بل وأن تدمِّرَ بُنيانَه. فعلى كوكبِ الأرض مثلاً، تتسبَّبُ قوة الجذبِ التفاضُليةُ التي يمارسها القمَرُ في حدوث المدِّ والجزر في المحيطات. بتعبير أوجَز، يكونُ وجهُ الأرض المقابلُ للقمر أشدَّ تعرُّضاً لجاذبية هذا الكوكبِ من الوجهِ الآخر، الأمرُ الذي يُحْدِث نوعاً من الانتفاخِ ويؤدِّي إلى حُدوثِ ظواهر المدِّ والجزر. ومن الطرائفِ التي يَجدُر الإشارةُ إليها أنَّ الشمس، التي تقع مِنّا على مسافةٍ أبعَدَ مِمّا يقعُ القمر، على أنَّها أضخَمُ منه كتلةً بكثيرٍ، تُحْدِث بدورِها تيّاراتِ مدٍّ وجزرٍ في المحيطات. وعندما تجتمِعُ تيّاراتُ المدِّ والجزر بتأثيرٍ من الشمسِ والقمرِ معاً، تَحدُث تيّاراتٌ واسعة المدى يطلق عليها المدَّ والجزرَ الشديدين. وعندما تتحرك هذه التيّاراتُ الواحد ضدَّ الآخر، يَكونُ لدينا ما يسمَّى

بالمدِّ والجزر الجُزْئِيَّين.

قوى المد والجزر
(قوة الجذب التفاضلية)

منظور الصاروخ　　　　منظور الثقب الأسود





إن الصاروخ الذي يَغُوص في جَوفِ ثقبٍ أسودَ

يخضَعُ إذن لقوة تمدُّدٍ معيَّنةٍ (الملاحظ أن الدافعاتِ تنجذبُ انجذاباً أقلَّ مما يفعلُ غطاءُ الصاروخ). وكما لو كان ذلك لا يَكفي، يقترِنُ هذا التمدُّد بانضغاطٍ مَرَدُّه إلى أن قوةَ الجَذْبِ على جانِبَيْ الصاروخ (وهي قوة تتَّجِه جِهَةَ مركزِ الثقب الأسودِ) تكون جزئيّاً موجَّهة صوب داخِلِه. وفي إطار النسبية العامّة، ترتبطِ قُوى المدِّ والجزر بكوْنِ مختلفِ أجزاءِ الصاروخ تتَّبع جِيوديزياتٍ متباينةً تَسيرُ بها نحو الثقب بوَتيراتٍ من التسارُعِ مختلفةٍ. وكلَّما اقتربَ الصاروخُ من الفرادة، تزايدتْ شدَّةُ هذه القُوى إلى أنْ تصيرَ لا متناهية، وهو ما يكبَحُ تماماً عملية استكشافِ الثقبِ الأسود...

هل تَقُود الثقوبُ السوداء إلى مكان ما؟

لطالَمَا أعملَ علماءُ الفيزياء وكتَّابُ أدبِ الخيال

العلمي النظرَ في إمكانِ استخدامِ الثقوبِ السوداء في السفر بين النجوم، علماً أن الثقب الأسودَ هو بمثابة مَدْخلٍ إلى نفَقٍ يقع في الفضاء الكونيِّ، نفقٍ يُدعى **ثقبَ الدُّودة** ويُفضي إلى مَخرَجٍ يُسَمَّى **النافورة البيضاءَ** (مَخرَجٍ يشكِّل النقيضَ التامَّ من الثقب الأسود). وبناءً على هذا، فمن شأنِ ثقبِ دودةٍ تعدادُ طولِهِ بضعُ كيلومتراتٍ أن يَصلَ بين مكانين تفْصِل بينهما سنواتٌ ضَوئية عَديدةٌ. وحَريٌّ بِنا أن نلاحظَ أنَّه على الرغم من أن هذا لا يَضمَنُ لنا بأي حالٍ وجودَ ثقوبِ الدودة، إلا أن هذه الثقوبَ تشكِّل حلاًّ صَحيحاً لمُعادَلاتِ النسبية العامَّةِ (حلاًّ تمَّ الاهتداءُ إليه منذُ عام 1916!). وبحسبِ ما وَصلتْ إليه الأبحاثُ حاليّاً في هذا الباب، يتَّضِح أن أمَدَ حياةِ ثقوبِ الدودةِ، إنْ صحَّ أنها تتكوَّنُ بكيفية تلقائية، هو أمدٌ قصيرٌ يَسيرٌ. لا تُعرَفُ إذن أيُّ وسيلةٍ يتأتَّى بها الإبقاءُ على هذا النفقِ مفتوحاً

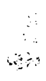
فترةً كافيةً كي يرْتادَهُ المستكشفُون ويَعبُروهُ من غير أن يفقِدوا حياتَهم، هذا إذا تيَسَّرَ لهُم سلفاً أن يَجِدوا طريقة تَقِيهم من كل المصاعِبِ التي ينطوي عليها تخطِّي أفق ثقبٍ أسْوَدَ.

هل للثقوبِ السوداء من فائدةٍ؟

ليسَ من المُحال من الناحية النظرية استخراجُ الطاقة من ثقبٍ أسود يوجَدُ في حالة دورانٍ، فذلك قد يتسنَّى باعتمادِ الطريقة التي ابتكرَهَا الفيزيائيُّ البريطاني «روجر بِنرُوز» Roger Penrose[7]، والتي تقْضِي بأن تقتربَ كبسولةٌ أوتوماتيكيّة من الثقب الأسودِ وتقذف فيه حُمُولتَها وفقَ مَسارٍ عَكسيٍّ (أي مَسارٍ يسيرُ في الاتِّجاه المعاكِس لاتجاهِ دورانِ الثقب). على هذا النحو يبدأُ دورانُ الثقبِ في التباطؤ بينما تأخذُ الكبسولةُ وتيرةً متسارِعةً. في

(7) روجر بِنرُوز (1931–) : عالِم بريطاني معاصِر أسهَمَ إسهامات كبيرة في حقلي الرياضيات والفيزياء. قام بصياغة نظرية في وصف انهيارِ النجوم على ذاتِها (ما بين 1964 و 1973). اشتغلَ رُفقة الفيزيائي الشهير ستيفن هاوكين على إنشاءِ نظرية في أصل الكون، وهي نظرية ضمَّنَها بِنرُوز إسهامَه الرياضيَّ في النسبية العامة المطبَّقة على الكوسمولوجيا وعلى دراسة الثقوب السوداء.

هذا السياق، تخيَّلَ عددٌ من علماءِ الفيزياء، أمثال شارل ميسْنِر[8] Charles Misner وكيب ثُورن Kip Thorne و جون ويلر John Wheeler، مُدُناً تُشيَّدُ حول الثقوب السوداء الدَّوَّارة، يتمُّ تزويدُها بالطاقة عن طريق الاستغلال الذكيِّ لهذه الطريقةِ. بعبارة مختصَرة، يُفترَضُ أن تقصِدَ كبسولاتٌ أوتوماتيكيّة الثقبَ الأسود لتَطرَحَ فيهِ نِفاياتِ المدينة، وأنْ تخضعَ للتسارُعِ تحت تأثيرِ الثقبِ، ثم أن يتمَّ استرجاعُها بواسِطة دوَّارات عملاقة تُحرِّكُ معَها مُنوِّباتِ المحطَّات الكهربائية. ولعلَّ هذا هو الحلُّ النهائي لمشكلة إعادة تصنيع النفايات!



(8) شارل ميسْنِر: فيزيائي أمريكي معاصِر متخصص في النسبية العامة. عُرِف على الأخص بمشاركتِه في تأليف كتاب *الجاذبية*، الذي يعدُّ أول مرجعٍ حديثٍ يفصِّل القول في هذه النظرية، رفقة كل منجون ويلرٍ وكيب ثُورن (1940–) المنظِّر الفيزيائي الأمريكي المعروف بإسهاماته الغزيرة في مباحث الجاذبية والفيزياء والفيزياء الفلكية..

هل يمكنُ أن تختفيَ الثقوبُ السوداء؟

إنه سؤالٌ يَبْعث على الاستغرابِ! فالناظرُ إلى خاصِّياتِ الثقوبِ السوداء يَبدُو له جليّاً أنَّ هذه النجوم الشَّرِهة سَيُقيَّضُ لها أنْ تكبُرَ وتتضخَّمَ إلى ما لا نهاية. لكن الفيزيائيَّ البريطانيَّ ستيفن هاوكين Stephen Hawking[9] بيَّنَ أنَّ الثقوب السوداء تتبخَّرُ متى أخِذَتْ بالحُسبانِ جملةٌ من الظواهرِ الكمِّية. إنَّ الميكانيكا الكوانطية تشيرُ في هذا السياق إلى أن الفراغَ ليسَ بذلك المكانِ الهادئ الذي نتصوَّرُه. ولا غرابة، فما نسمِّيه فراغاً يظلُّ يولِّد باستمرارٍ أزواجاً من الجُزَيئات الدقيقة المضادَّةِ

(9) ستيفن هاوكين (1942–): عالم إنجليزي تخصَّص في الكوزمولوجيا والرياضيات التطبيقية والتنظير للفيزياء. ذاع صيتُه بفضل دراساته حول الثقوب السوداء وأصل الكون والجاذبية الكمية.

للجزيئات الدقيقة، أزواجاً لها أمدُ حياةٍ قَصيرٌ جدّاً (والجزيْء المضاد يماثِل الجزيء تمامَ المماثلةِ تقريباً، ولا يختلِف عنه إلا منْ حيث شحنتُه الكهربائية، التي تَكُون لها علامةٌ معاكِسة). وعندما تتشكَّلُ هذه الأزواجُ في مكانٍ شديدِ القُربِ من أفُقِ الثقب الأسود، يَغدُو من الممكن أن تسقطَ إحدى الجُزيْئَتينِ في الثقبِ فيما تَسِيحُ الأخرى في الفضاء. وطبقاً للحِسابات التي وَضعَها «ستيفن هاوكين»، يتوفّرُ الجُزَيء المضادُّ على حظوظٍ أوفرَ للسقوط في الثقب مما يتوفَّرُ عليه الجزيْء. والأثرُ الواضحُ الذي يترتَّبُ عن ذلك هو أنَّ الثقب الأسودَ يفقِدُ بعضَ كتلتِه ويشرَعُ إثرَ ذاك في التقلُّص. إن سيرورةَ التبخُّر هذه هي سيرورَةٌ شديدة البُطءِ، ولا تُستَثنى منها سِوى الثقوبِ السوداء ذاتِ الكتلة الضئيلةِ، التي تبقى وحدَها بِمَنْأى عن هذا التبخُّر البطيءِ.

لكنْ هل توجَد ثقوبٌ سوداءُ من هذا القبيل؟

لقد لَمَّحَ ستيفن هاوكين إلى أن الانفجار العظيم الخلاق big-bang، ربَّما أحدثَ ثقوباً سوداءَ لها كتلة ضئيلةٌ جدّاً، يُطلق عليها **الثقوب السوداء الأولية؛** وهيَ ثقوبٌ تُقاربُ كتلتُها كتلةَ جبلٍ بينما يُضاهي حجمُها حجمَ نواة ذَرَّة. وبذا فهي خليقةٌ بأن تشهدَ تبخُّراً فعَّالاً إلى حدٍّ بعيدٍ. وممَّا تتنبَّأُ به النظرية أن هذا التبخّرَ سينتهي بانفجارٍ يصاحِبُه انبعاث أشعة ص (أو y، وهي أشعَّة أقوى طاقةً من الأشعة السينية المعروفة أصلاً بِطاقتِها الشديدة). بيد أن الملاحظاتِ الراهنةَ لا تسمح بالبتِّ على وجه اليقينِ في مسألة وجودِ هذا الضَّرب من الثقوب السوداء؛ ويَتبيَّنُ في ضوئِها أن الفضاء الممتدَّ بين النجوم لا يسَعُه أن يَحويَ أكثرَ من ثلاثمائة ثقبٍ في كل مكعَّبٍ يُساوي ضِلعُه سنةً ضوئية.

خاتمة

خِلافاً لُمعظَم الأجرامِ السَّماوية المكتشَفة عن طريق الملاحَظة، رأتِ الثقوبُ السوداء النورَ أوَّلَ ما رأتْهُ بوصفِها نتاجاً صِرفاً للعقْلِ البشري. وقد ظلتْ رَدْحاً طويلاً من الزمن تشكِّل وحدَها من دون غيرِها ذلك الموضوعَ الدخيلَ الغريبَ الذي خاض فيه مُنظِّرون لم يُقيَّضْ لهم أن يُلاقُوا غيرَ الرفضِ والإنكارِ من لدُنِ زملائهم. أما اليوم، فقد أضحى وجودُها أمراً لا يرْقَى إليه الشك. إنَّ من سماتِ الثقوب السوداء أنها تقدِّمُ تفسيراً مُقْنعاً لجُملةٍ من الظواهرِ الفيزيائية الفلكيةِ التي تُحرِّك كمياتٍ هائلةً من الطاقة. وهي تبدُو بمثابةِ الطوْرِ النهائيِّ في سيرورةِ تطوِّر أضخم النجومِ كتلةً، كما تضطلعُ بدَوْرِ المحرِّكِ الذي عليه يقومُ النشاطُ الجارِي في قلب المجرَّات. وقد أتاحتْ لنا دراسةُ

الثقوب السوداءِ أن نُطوِّرَ فهْمَنا للنسبية العامة وأن نقِفَ على نقائِصِ هذه النظرية. وإذا كانت الفرادَةُ المْنزَويةُ في قلبِ الثقوب السوداء في غيرِ متناوَل الفيزياء الراهنة، فإن دراستَها قد رَسمتْ من المَعالم ما سيسمَحُ بالجمع بين النسبيةِ العامة وميكانيكا الكَمَّاتِ وصَوْغِهما في نظرية واحدة هي الجاذبية الكمِّية، التي ربما تكون هيَ النظرية النهائية التي يسعى وراءَها علماءُ الفيزياء.

ثبت بالمصطلحات

attraction gravitationnelle	:	قوَّةَ الجَذب
poids	:	وزن
gravité	:	ثقل
masse	:	كتلة
volume	:	حجم
rayon	:	شُعاع
force centrifuge	:	قوة نابذة
force centripète	:	قوة جاذبة
sonde	:	مسبار (ج. مسابير)
vitesse de libération	:	سرعة التحرُّر
mécanique quantique	:	الميكانيكا الكمِّية (أو الكوانطية)
quantum (plur. quanta)	:	كَمّة (ج. كمَّات)
gravitation quantique	:	الجاذبية الكمِّية
Relativité générale	:	النسبية العامة
Relativité restreinte	:	النسبية الخاصة
espace-temps	:	زَمَكان

géodésique	:	جيوديزيا
trajectoire	:	مسير
orbite	:	مدار
molécule	:	جُزيْء
particule	:	جزَيء دقيق
antiparticule	:	جزَيء دقيقة مضادَّة
courbure	:	تقوُّس
cosmologie	:	كوْنيّات أو كوسمولوجيا
photon	:	فُوتُون
singularité	:	فرَادة
horizon des événements	:	أُفُقُ الأحْداث
temps propre	:	زمن خاص
temps apparent	:	زمن ظاهر
rougissement gravitationnel	:	احمرار جاذبي
rayonnement	:	إشعاع
fréquence	:	تردُّد
vibration	:	اهتزاز
elliptique. parabolique	:	إهليلجيّ

élément synthétisé	:	عنصر مركّب
naine blanche	:	النجم القزمي الأبيض
pression de dégénérescence	:	ضغط الانحلال
Fusion thermonucléaire	:	انصهار حراري نووي
implosion	:	انضغاط
neutron	:	نوترون
électron	:	إلكترون
noyau	:	نواة (ج. نوَى)
galaxie	:	مَجرّة
disque d'accrétion	:	قرص التضَخُّم
système binaire	:	نظام ثنائي
rayons X	:	أشعة سينية
Supermassif	:	ذو كتلة هائلة
ondes gravitationnelle	:	موْجات الجاذبية
détecteur	:	كاشف
grandeurs	:	مقادير
cinétique	:	حَرَكي
charge	:	شحنة

rotation	:	دوران
rotor	:	دَوَّار
théorie des supercordes	:	نظرية الحبال العُظمَى
électromagnétique	:	كهْرُمَغناطيسي
principe de la censure cosmique	:	مبدأ الحَظْر الكوني
forces de marée	:	قُوى المد والجزر
attraction gravitationnelle différentielle	:	قوة الجذبِ التفاضُلية
alternateur	:	مُنوِّب
réchauffement	:	احترار
émission	:	انبعاث
aplati	:	مبَطّح
propulseur	:	دافعة
trou de ver	:	ثقب الدودة
recyclage des déchets	:	إعادة تصنيع النفايات
big-bang	:	الانفجار العظيم الخلاق

هذا الكتاب

خِلافاً لُمعظَم الأجرامِ السَّماوية المكتشَفة عن طريق الملاحَظة، رأتِ الثقوبُ السوداء النورَ أوَّلَ ما رأتْهُ بوصفِها نتاجاً صِرفاً للعقْلِ البشري. وقد ظلتْ رَدْحاً طويلاً من الزمن تشكِّل وحدَها من دون غيرِها ذلك الموضوعَ الدخيلَ الغريبَ الذي خاض فيه مُنظِّرون لم يُقيَّضْ لهم أن يُلاقُوا غيرَ الرفضِ والإنكارِ.

إنَّ من سماتِ الثقوب السوداء أنها تقدِّمُ تفسيراً مُقْنعاً لجُملةٍ من الظواهرِ الفيزيائية الفلكيةِ التي تُحرِّك كمياتٍ هائلةً من الطاقة.

يتطرق الكتاب إلى هذا الموضوعِ في سياق صِلته بجملةٍ من قضايا الفيزياء الفلكية وبوصفه من الإشكالاتِ العصيَّة على الفيزياء المعاصرة، وذلك في شكل تساؤلات عدة اتخذها عناوينَ لفصول كتابه، حيث حاول بدءاً بيانَ ماهية الجاذبية باعتبارها تلك

القوة الطبيعية المتسبِّبة في وجود الثقوب السوداء، وقد بَسَط الكلام فيها من منظورنيوتن، ومن وجهة نظر أينشتاين. ثم صَرَف عنايتَه إلى استجلاء العلاقة بين الثقوب السوداء والنجوم السوداء، وسعى في إبراز جملة من السمات المثيرة والخصائص المدهشة التي تزخرُ بها الثقوب السوداء، مبيِّناً كيفية تكوُّنها، ومحتواها، وأنواعها. كما تساءل عن إمكان رؤيتها واحتمالِ اختفائها، وعن الفائدة التي يمكن أن تُجنى منها، وعن إمكان استخدامِها في السَّفر عبرَ الزَّمكان وكذا عن آفاق البحث التي تفتحها.

وقد حرَص الكاتب أيضاً على أن يُمعنَ النظر في الملاحَظاتِ الفلكية التي تنتصِرُ لفكرَةِ وجودِ الثقوب السوداء؛ ذلك أن هذه الأجرام قد صارت تكتسي أهمية كبرى من منظور الفيزياء الفلكية الحديثة، إذ مِن شأنِها مثلاً أن تقدِّم تفسيراً لما يتولَّد من طاقة هائلة في قلبِ بعض المجرَّات.

نبذة عن المؤلف:

باسكال بُوردي Pascal Bordé باحث فرنسي متخصّص في الفيزياء والفيزياء الفلكية. يشتغل بقسم الفلك بجامعة هارفارد. وهو أستاذ محاضِر بجامعة باريس الجنوبية 11. يمارِس البحث العلمي بمعهد الفيزياء الفلكية الفضائية التابع لهذه الجامعة. حيث يعمل على اكتشاف وتوصيف الكواكب الواقعة خارج المنظومة الشمسية. أصدر العديد من الدراساتِ والأبحاث. من بينها: هل توجد في الكون كواكب أخرى مأهولة؟ (2004). كم لوناً يوجد في قوس قزح؟ (2008).

نبذة عن المترجم:

محمد سعيد الخلادي من مواليد مدينة تطوان بشمال المغرب. عام 1962. حصل على التبريز في الترجمة ويعمل حالياً أستاذاً للترجمة واللغة الفرنسية والتواصل بالمدرسة العليا للأساتذة بتطوان؛ سبق له أن درّس الترجمة بمدرسة الملك فهد العليا للترجمة بطنجة؛ وصدرت له العديد من الترجمات من العربية إلى الفرنسية.



ما الثقوب السوداء؟

خِلافاً لمُعظَم الأجرامِ السَّماوية المكتشَفة عن طريق الملاحَظة، رأتِ الثقوبُ السوداء النورَ أوّلَ ما رأتْهُ بوصفِها نتاجاً صِرفاً للعقْلِ البشري. وقد ظلتْ رَدْحاً طويلاً من الزمن تشكِّل وحدَها من دون غيرِها ذلك الموضوعَ الدخيلَ الغريبَ الذي خاض فيه مُنظِّرون لم يُقيَّضْ لهم أن يُلاقوا غيرَ الرفضِ والإنكار.

إنَّ من سماتِ الثقوب السوداء أنها تقدِّمُ تفسيراً مُقْنعاً لجُملةٍ من الظواهرِ الفيزيائية الفلكيةِ التي تُحرِّك كمياتٍ هائلةً من الطاقة.

يتطرق الكتاب إلى هذا الموضوعِ في سياق صِلته بجملةٍ من قضايا الفيزياء الفلكية وبوصفه من الإشكالاتِ العصيَّة على الفيزياء المعاصرة.








9 789948 170327